Vol. 20 No. 4
Jul., 2023
天 文 研 究 与 技 术
ASTRONOMICAL RESEARCH & TECHNOLOGY
第 20 卷 第 4 期
2023 年 7 月

DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230324.001

首次火星探测 70 米天线结构保型设计

李 燕[1,2]，赵武林[1,2*]，李大涛[3*]

（1. 中国电子科技集团公司第三十九研究所，陕西 西安 710065；2. 陕西省天线与控制技术重点实验室，陕西 西安 710065；3. 长安大学工程机械学院，陕西 西安 710064）

摘要：详细介绍了首次火星探测 70 m 天线结构保型设计的实现方法和关键要素：用伞形支撑结构实现反射体等刚度支撑，达到结构变形均匀化，提高主反射面的吻合精度，为保型设计奠定坚实基础；用三自由度调整机构实现副反射面随动控制，补偿主反射面最佳吻合以及副面支撑结构变形带来的电性能下降，为保型设计提供有力保障。工程中用到的等刚度设计理念为国内鲜有的设计理念，对我国后期大口径天线设计具有参考意义。三自由度调整机构能够有效补偿副面支撑结构变形以及主反射面最佳吻合后焦点位置调整带来的电性能下降。

关键词：保型设计；等刚度设计；最佳吻合技术；副面随动控制；大口径天线

中图分类号：P111.44 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2023)04-0283-07

1 概 述

我国首次火星探测任务已顺利完成，按照任务分工，首次火星探测任务地面应用系统需要建设一台 70 m 口径全可动天线[1-3]。根据首次火星探测任务地面应用系统实施方案，新建成的天线主要完成火星遥感数据接收工作，同时为了对天线反射体结构变形进行测量，要求天线具有 Ku 频段地球同步卫星信号接收能力。由于火星距离地球较远[4]，相当于月球到地球距离的 135 倍，为能清晰、准确地接收来自火星的信号，要求 70 m 天线在高增益的同时要降低副瓣电平，提高天线的增益与噪声温度的比值[5]。对于 70 m 天线结构设计而言，需要提高天线反射面的精度，将反射面误差控制在 0.9 mm(rms)以下。

由于大口径天线结构数千吨的自重(如天马 65 m 望远镜自重达 2.68×10^6 kg[6]，佳木斯 66 m 望远镜自重达 3.0×10^6 kg)，导致结构设计师很难将变形精度控制在毫米甚至亚毫米量级，大尺寸、高重量、大变形的特点也导致变形精度成为结构设计的难点。文[7-8]提出天线保型设计的思想，即采用最佳吻合的方式将变形后的抛物面吻合成一个新的抛物面，同时将馈源移动到新的焦点上，以满足电磁波反射原理，实现电磁波反射。这种早期的保型设计思想主要针对单反射面天线，后期由于双反射面天线越来越多，保型设计思想也有所扩展和完善。保型设计思想为结构设计指出一条新的思路，并且在国外多台大口径望远镜上均有体现[8]，如德国 Effelsberg 100 m 天线，意大利撒丁岛(SRT)64 m 天线等。国内大口径天线虽也有应用，但效果欠佳。因此，火星探测 70 m 天线作为双反射面天线，在被动控制情况下，要求反射面总精度达到 0.9 mm，必须要有优良的保型设计效果。

2 70 m 天线保型设计与实现

大口径天线机电耦合设计中，为了达到良好的电磁性能效果，需要采用保型设计解决大口径天线

收稿日期：2023-02-08；修订日期：2023-03-01
作者简介：李 燕，女，高级工程师，主要研究天线结构设计. Email：liyan510368741@163.com.
* 通信作者：赵武林，男，研究员，主要研究天线机械结构设计. Email：wulin5678@163.com.
李大涛，男，副教授，主要研究大型机械结构设计与分析. Email：ldt1688@chd.edu.cn.

巨大变形引起的天线性能大幅下降的难题。对双反射面天线而言，一方面多采用最佳吻合技术提高主反射面精度，另一方面需要对副反射面进行最佳吻合，并针对主反射面吻合结果调整副反射面位姿到最佳吻合抛物主面焦点处。对于指向要求非常高的大口径天线，还不能忽略馈源相心位置误差带来的影响。对 70 m 天线而言，由于其最高工作在 Ku 频段，未达到 Ka 或者更高频段的范畴，且副反射面口径为 6.1 m，因此考虑忽略两点因素：(1)副反射体自身结构变形带来的电性能影响；(2)馈源支撑结构变形引起的馈源相心误差带来的电性能影响，这两点因素对 70 m 天线电性能的影响尚在可接受范围内(实际使用情况也验证了这两点对天线性能影响在可接受范围内)。因此，在实际工程中，70 m 天线保型设计仅考虑主反射面的最佳吻合效果以及副反射面位姿调整。

2.1 70 m 天线主面最佳吻合与实现

最佳吻合效果直接影响到天线面型精度水平。研究发现，当天线主面变形越是均匀连续，最佳吻合的效果越好。天线主反射面支撑在轴向均匀对称的反射体结构上，因此，影响主反射面变形的主要因素是主反射体的支撑形式[9]。传统天线结构设计中，将天线反射体和座架分别设计，力的传递主要有两条路径：(1)反射体大部分载荷通过俯仰座架直接传递到俯仰轴承座和方位座架，导致天线座架对反射体支撑刚度很强；(2)反射体少部分载荷通过俯仰大齿弧传递到天线二层平台，由于俯仰大齿弧与俯仰减速器之间属于啮合关系，因此俯仰大齿弧对反射体支撑刚度相对较弱。设计中为了减小反射体变形，常常通过增加反射体和座架的连接面积来增加天线座架对反射体的支撑刚度，这种设计理念属于刚性设计(即支撑刚度越刚越好)，对中小口径天线是可行的，对于大口径天线，尤其是高频段大口径天线，往往由于座架顶面对中心体底面支撑刚度不均匀而导致反射体变形不均匀，进一步导致最佳吻合效果不理想。

70 m 天线结构设计中，摒弃传统的天线结构设计理念——反射体支撑越刚越好，而是采用等刚度设计理念，将反射体结构和俯仰座架进行统一设计，即用伞形支撑结构将俯仰大齿弧和配重以及俯仰座架对反射体的作用力均匀分散到反射体上，将传统设计中反射体和背架连接强的地方削弱，连接弱的地方增强，从而实现反射体支撑刚度均匀化。

图 1 为 70 m 天线等刚度设计伞形支撑结构，天线伞形支撑结构形成十六边框，这 16 个点均匀支撑在反射体背架上。同时释放俯仰大齿弧、俯仰轴承座和反射体之间的直接约束，降低了俯仰大齿弧和配重对反射体背架变形不均匀的影响。

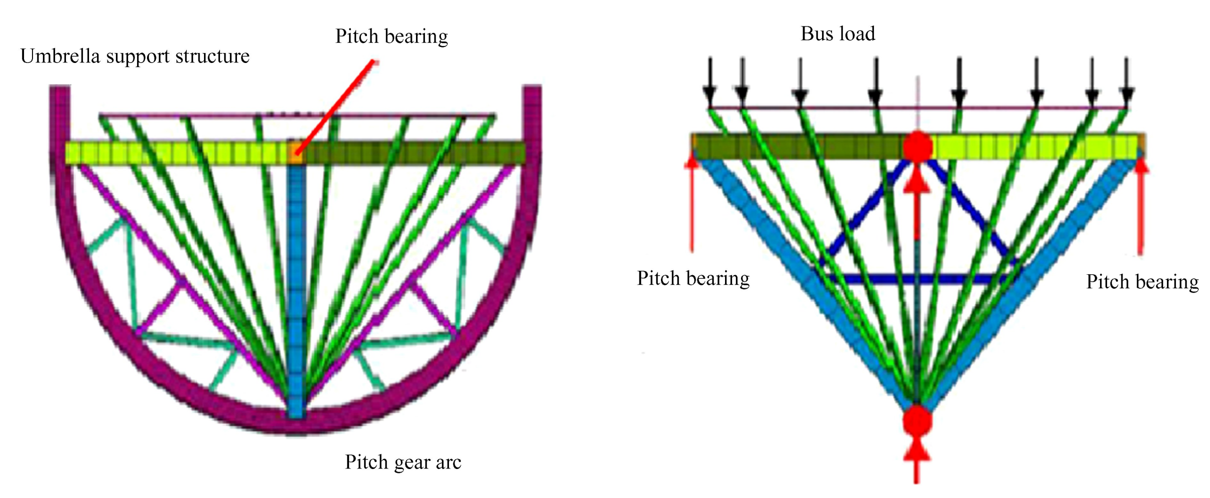


图 1 70 m 天线俯仰座架三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure of 70 m antenna pitching seat frame

图 2 和图 3 分别为 70 m 天线等刚度设计前、后反射体变形云图。从图中可以明显看出，虽然两种设计理念下反射体结构变形最大值接近，但等刚度设计前，反射体变形呈船型分布，且不均匀，反射体结构最外环变形不均匀性达到 6 mm；等刚度设计后，反射体变形呈辐射状分布，并且在同一圆

环上变形均匀，反射体结构最外环变形不均匀性仅为 1 mm。由此可见，等刚度设计后，反射体结构变形的均匀性显著提高。

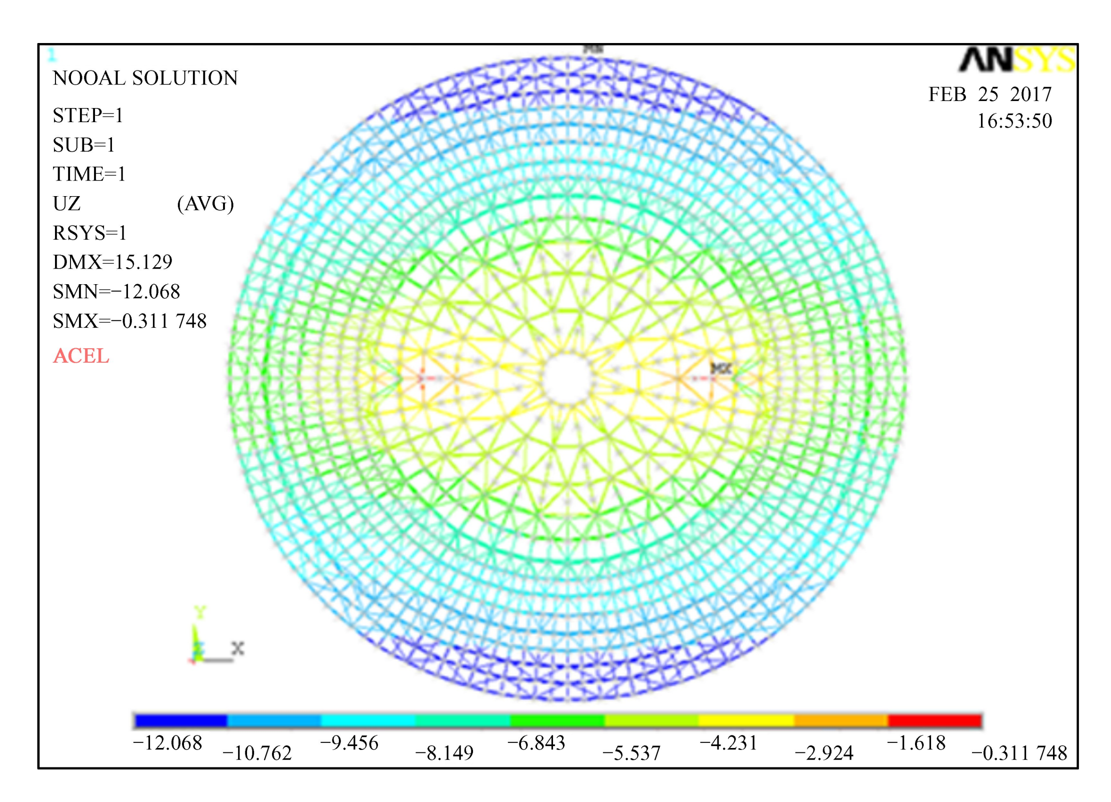


图 2　等刚度设计前 70 m 天线主反射体结构变形云图

Fig. 2　Structure deformation cloud image of the main reflector of the 70 m antenna before equal stiffness design

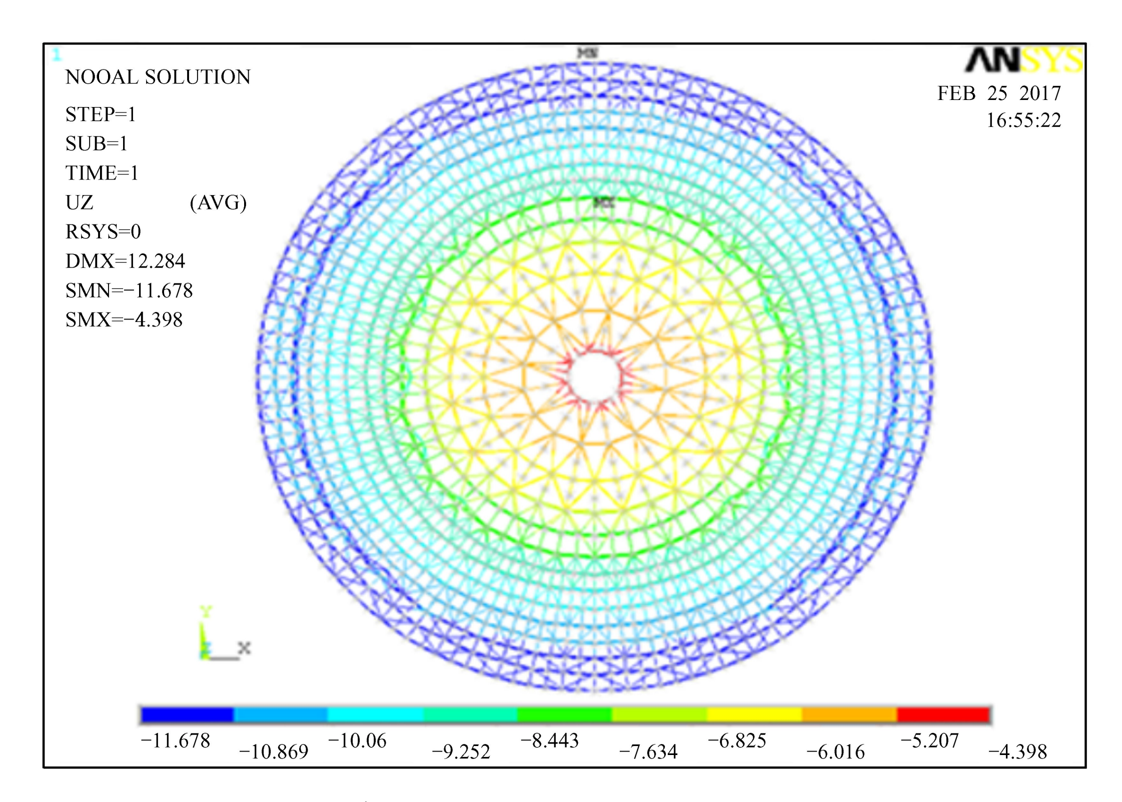


图 3　等刚度设计后 70 m 天线主反射体结构变形云图

Fig. 3　Structure deformation cloud image of the main reflector of the 70 m antenna after equal stiffness design

等刚度设计使 70 m 天线反射体变形更加均匀。然而，不可避免地，在重力作用下反射体发生整体位移和旋转，以及节点间发生相对变形，引起电磁波在经主反射面到达副面的路径中出现光程差，造成电磁波的相位误差，使天线效率下降，增益降低。因此，在主面使用最佳吻合技术的同时也需要使用预调技术[10]，使天线在高低仰角时精度更加均匀。提取以上两种支撑效果时天线反射体变形数据，考虑装配误差、测量误差等，计算得到 70 m 天线反射体两种支撑方式下精度曲线如图 4。

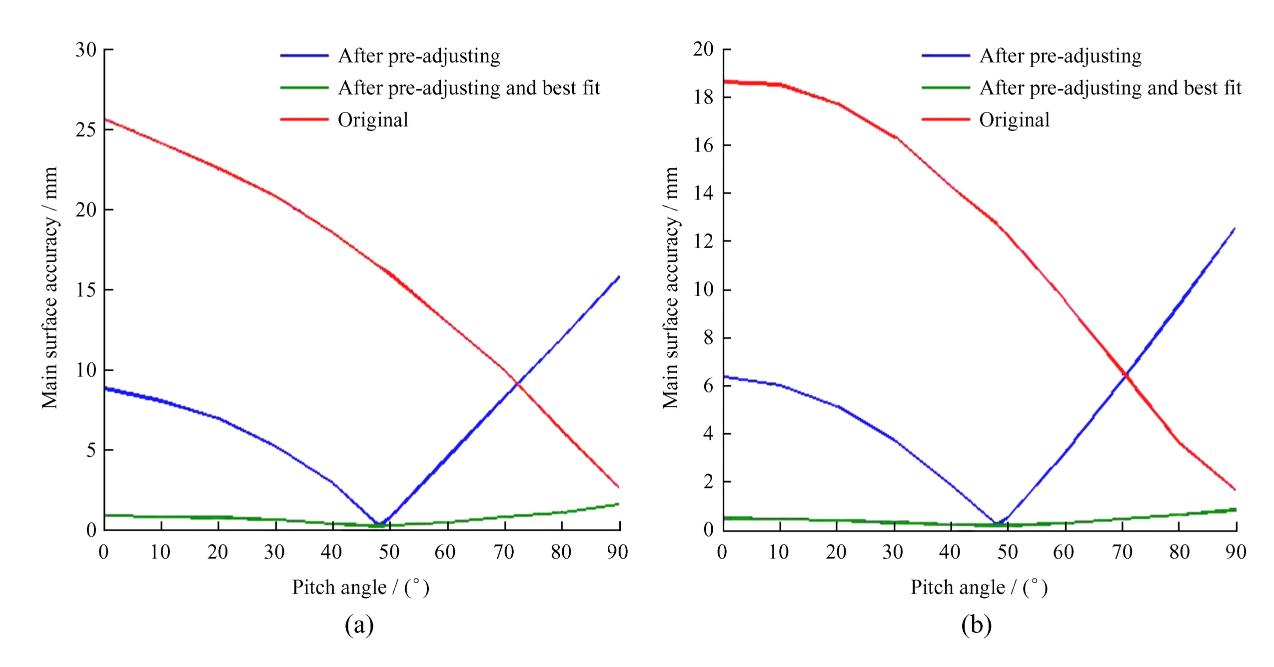


图 4 70 m 天线主面精度随俯仰角变化曲线图。(a)等刚度设计前；(b)等刚度设计后

Fig. 4 The main surface accuracy of 70 m antenna varies with pitch angle. (a) Before equal stiffness design; (b) after equal stiffness design

由图 4 可知，两种支撑方式下，天线主面精度随仰角的变化趋势一致，但等刚度设计后，主反射面原始精度由 25.7 mm(rms)提高到 18.6 mm(rms)；采用预调加最佳吻合后，主反射面精度由 1.54 mm(rms)提高到 0.8 mm(rms)，其中，等刚度设计前精度提高 16.69 倍，等刚度设计后精度提高 23.25 倍。可见等刚度设计后，70 m 天线主反射面精度有很大提升。

2020 年 9 月，天线主反射面安装完成后，在 48°仰角时使用摄影测量系统对主反射面进行调整和精度测量，多次调整后，最终在 48°仰角反射面精度达到 0.35 mm(rms)。在天线多个仰角进行了主反射面精度测量，测量结果为全仰角范围内主反射面精度优于 0.85 mm(rms)，与理论数值相差 6%，满足任务指标要求。

等刚度设计技术在国内大天线设计中属于首次应用[11]。以往大天线设计也使用伞形支撑结构，但由于设计理念不同导致支撑形式和最佳吻合效果并不理想。70 m 天线等刚度设计技术的成功应用象征着国内大口径天线设计技术的进一步提升，与国际水平更加接近。

2.2 70 m 天线副面位姿调整与实现

70 m 天线在采用等刚度设计后，主反射面最佳吻合效果大幅提升，主面精度大幅提高。然而，一方面，从理论层面上来讲，经过最佳吻合后，需要将副面由原理论位置偏移到与最佳吻合抛物主面相匹配的位置，才能避免由主反射面最佳吻合引入的天线效率和指向性能下降，达到优化天线性能的目的；另一方面，从实际层面上来讲，需要移动副面位姿，克服天线副面支撑结构变形引起的副面位姿变化[5]，才能使天线几何结构与理论值更加接近，发挥更优的性能。为满足以上两方面要求，在 70 m 天线设计中，我们采用副面随动控制技术实现天线副面位姿的调整功能，即利用三自由度副面调整机构(见图 5)，在天线工作时，实现副面随天线姿态变化而主动调整自身位姿，使天线性能更优。

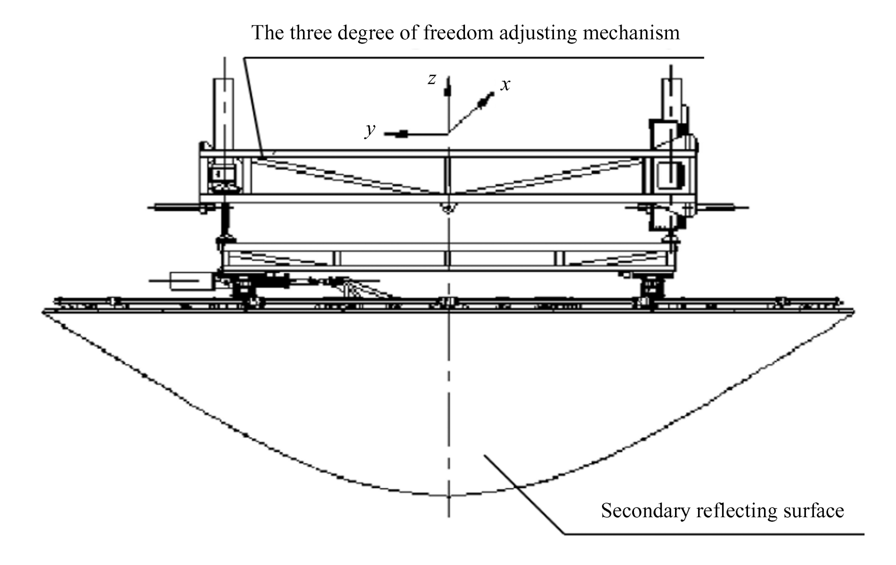


图 5　三自由度副面调整机构示意图

Fig. 5　Schematic diagram of three degrees of freedom sub-surface adjusting mechanism

在 70 m 天线副面随动技术实现中，首先需要通过测量数据解算出天线不同工作姿态时副面实际位置以及需要到达的理论位置，然后再根据副面在空间 x，y 和 z 三个方向的实际坐标运动函数，解算出三自由度调整机构的调整量，通过内置程序即可实现副面随动的效果。

图 6 为 70 m 天线副面不随动 X 频段俯仰实测方向图。由图 6 可明显看出，副面如果不随俯仰随动，方向图不规则。图 7 为 70 m 天线副面随动 X 频段俯仰实测方向图。比较图 6 和图 7 可以明显看出，虽然两种结构的方向图接近，但后者方向图更加规则，可见副面随动效果显著。

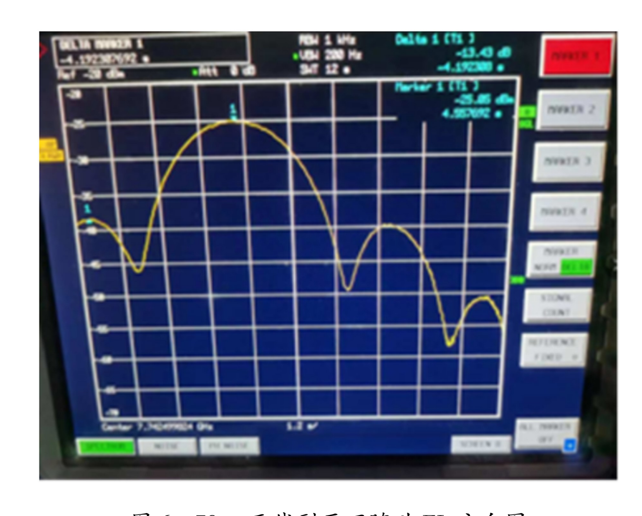


图 6　70 m 天线副面不随动 EL 方向图

Fig. 6　The EL directional diagram of the 70 m antenna without following-up secondary plane

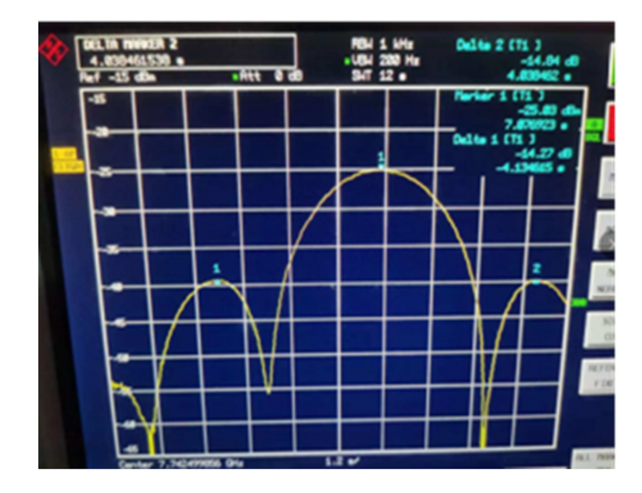


图 7　70 m 天线副面随动 EL 方向图

Fig. 7　The EL directional diagram of the 70 m antenna with following-up secondary plane

3　结　论

本文介绍了首次火星探测 70 m 天线保型设计的原理和实现方法，即主反射面最佳吻合以及副反射面随动控制。保型设计后，70 m 天线电性能得到大幅提升，主反射面精度由 25. 7 mm(rms)提高到 0. 8 mm(rms)。后期多次测试，70 m 天线实际主反射面精度在全仰角范围内达到 0. 85 mm(rms)，工作效率达到 70%以上，指向精度达到 8. 8″，满足火星探测的需要。本文得到以下结论：

(1)70 m 天线主反射体设计中摒弃传统刚性设计的原则，采用伞形支撑结构实现等刚度设计的效果，使主反射体变形实现均匀化，吻合效果提升，为保型设计奠定坚实基础。

(2)70 m 天线副反射面设计中采用三自由度调整机构，实现副反射面随动控制，以满足天线保型设计的需要，为保型设计提供有力保障。

(3)由于 70 m 天线最高工作频段仅为 Ku 频段，实践证明，在保证副反射面和馈源支撑结构自身刚度的情况下，保型设计后，副反射面自身变形以及馈源相心变化对天线性能影响可忽略不计。但对于更高频段大口径天线而言，这两方面对天线性能影响尚需讨论。

(4)本文介绍的设计方法，在国内其他天线上鲜有尝试，可为其他工程提供有力参考。

参考文献：

[1] 孔德庆，李春来，张洪波，等. 火星探测天线组阵数据接收技术研究和验证实验 [J]. 宇航学报，2020，41(7)：948-958.
KONG D Q，LI C L，ZHANG H B，et al. Research and verification experiments of data receiving technologies based on antenna arraying for Mars exploration of China [J]. Journal of Astronautics，2020，41(7)：948-958.

[2] 耿言，周继时，李莎，等. 我国首次火星探测任务 [J]. 深空探测学报，2018，5(5)：399-405.
GENG Y，ZHOU J S，LI S，et al. Review of first Mars exploration mission in China [J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5(5)：399-405.

[3] 刘建军，苏彦，左维，等. 中国首次火星探测任务地面应用系统 [J]. 深空探测学报，2018，5(5)：414-425.
LIU J J，SU Y，ZUO W，et al. Ground research and application system of China's first Mars exploration mission [J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5(5)：414-425.

[4] 杨鹏，黄勇，李培佳，等. 同波束 VLBI 测量下的“天问一号”火星车定位及精度分析 [J]. 武汉大学学报（信息科学版），2023，48(1)：84-91.
YANG P，HUANG Y，LI P J，et al. Positioning and accuracy analysis of Tianwen-1 Mars rover based on same-beam VLBI measurement [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2023，48(1)：84-91.

[5] 叶尚辉，李在贵. 天线结构设计 [M]. 西安：西北电讯工程学院出版社，1986：1.
YE S H，LI Z G. Antenna structure design [M]. Xi'an：Northwest Telecommunication Engineering Institute Press，1986：1.

[6] 米宏伟，刘国玺，郑元鹏，等. 65 米射电望远镜天线静动力学分析 [J]. 中国电子科学研究院学报，2012，7(4)：419-422.
MI H W，LIU G X，ZHENG Y P，et al. Static and dynamic analysis of 65 m radio telescope antenna [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology，2012，7(4)：419-422.

[7] SEBASTIAN V H. The design of large steerable antennas [J]. The Astronomical Journal，1967，72(1)：35-47.

[8] BAARS J W M，KARCHER H J. Radio telescope reflectors historical development of design and construction [M]. Berlin：Springer International Publishing AG，2018.

[9] 吴凤高. 天线座结构设计 [M]. 西安：西北电讯工程学院出版社，1986：1.
WU F G. Structure design of antenna base [M]. Xi'an：Northwest Telecommunication Engineering Institute Press，1986：1.

[10] 王伟，段宝岩，马伯渊. 重力作用下天线反射面变形及其调整角度的确定［J］. 电波科学学报，2008，23(4)：645-650，698.
WANG W，DUAN B Y，MA B Y. Gravity deformation and best rigging angle for surface adjustment of large reflector antennas［J］. Chinese Journal of Radio Science，2008，23(4)：645-650，698.

[11] 李东伟，赵武林，张萍，等. 大口径天线均载支撑结构：CN210984915U［P］. 2020-07-10.
LI D W，ZHAO W L，ZHANG P，et al. Support structure of large-aperture antenna with equal load：CN210984915U［P］. 2020-07-10.

Structure Preservation Design of 70-meter Antenna for the First Mars Exploration

Li Yan[1,2]，Zhao Wulin[1,2*]，Li Datao[3*]

(1. The 39th Research Institute of CETC，Xi'an 710065，China，Email：wulin5678@163.com；
2. Shaanxi Key Laboratory of Antenna and Control Technology，Xi'an 710065，China；
3. School of Construction Machinery，Chang'an University，Xi'an 710064，China，Email：ldt1688@chd.edu.cn)

Abstract：In this paper，the method and key elements of the 70 m antenna structure preservation design for the first Mars exploration are introduced in detail. The umbrella-like support structure is used to realize the equal stiffness support of the reflector，so as to achieve the effect of uniform deformation of the structure，improve the anastomosing accuracy of the main reflector，and lay a solid foundation for the preservation design. Three degrees of freedom adjusting mechanism is used to realize the effect of the secondary reflector following control，compensate the best fit of the main reflector and the electrical performance decline caused by the deformation of the secondary support structure，and provide a strong guarantee for the shape preservation design. The design concepts of equal stiffness used in this project are rare design concepts in China and have reference significance for later large-aperture antenna design in our country. The three degree of freedom adjusting mechanism can effectively compensate the electrical performance degradation caused by the deformation of the auxiliary support structure and the adjustment of the focus position after the best fit of the main reflector.

Key words：preservation design；equal stiffness design；best fitting technique；secondary surface follow-up control；large aperture antenna